

за счет применения газовых турбин с генерацией электрической энергии может открыть возможности для значительной экономии топлива по сравнению с раздельной генерацией электрической энергии на удаленной электростанции и охлаждением дымовых газов за счет разбавления их холодным воздухом.

Список литературы

1. Тепловые и атомные электростанции : справочник / М. С. Алхутов, А. Н. Безгрешнов, Р. Г. Богоявленский [и др.]. М. : Издательский дом МЭИ, 2007. 648 с.

УДК 62-831

Казакбаев В. М., Боровских М. О., Нечаев А. В., Прахт В. А.
Уральский федеральный университет,
emf2010@mail.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА НАСОСА

Трехфазный частотно-регулируемый электропривод (ЧРП) составляет значительную часть применяемого в промышленности и коммунальном хозяйстве электропривода. Помимо достижения высоких показателей обслуживаемого технологического процесса, применение ЧРП позволяет также получить значительный эффект энергосбережения. Современные требования к энергоэффективности таких установок регламентируются стандартами Международной энергетической комиссии (ИЕС).

В варианте системы ЧРП, повсеместно реализуемом в настоящее время в РФ, используются асинхронный электродвигатель (АД) класса энергоэффективности IE1 (EFF2) (классы энергоэффективности, согласно ГОСТ Р 54413-2011) и преобразователь частоты (ПЧ), адаптированный для управления АД. Регулирование скорости ЧРП обычно осуществляется по скалярному закону $U/f = \text{const}$. Такой способ регулирования прост и дешев в реализации, обеспечивает достаточный запас перегрузочной способности, не предъявляет повышенных требований к производительности микропроцессора ПЧ и не требует применения датчиков обратной связи в составе привода. Однако энергоэффективность такой конфигурации достаточно сильно падает при необходимости длительной работы привода на скорости ниже номинальной.

На рис. 1,а приведено теоретическое сравнение (по схеме замещения) величины КПД для АД 0,55 кВт, 1500 об/мин при частотном регулировании, для случая работы на насосную нагрузку. Рассмотрены случай регулирования по закону $U/f = \text{const}$ (сплошная линия) и случай регулирования по закону $U/f^2 = \text{const}$ (штриховая линия), который при данной нагрузке оказывается оптимальнее. Второй случай на практике соответствует более сложным векторным системам регулирования, с использованием датчиков обратной связи. Видно,

что величина увеличения КПД для второго случая (штриховая линия), в сравнении с первым случаем (сплошная линия), возрастает по мере увеличения глубины регулирования (уменьшения скорости). При скорости двигателя 40 % от номинальной разница в КПД между двумя рассматриваемыми случаями составляет уже более 15 %. Существуют и другие решения, которые могут значительно увеличить энергоэффективность насосной установки с ЧРП. Например, применение синхронных двигателей (СД) вместо АД: в этом случае значительно повышается КПД привода в номинальном режиме, а при регулировании скорости КПД будет уменьшаться в меньшей степени (рис. 1,а, штрихпунктирная линия).

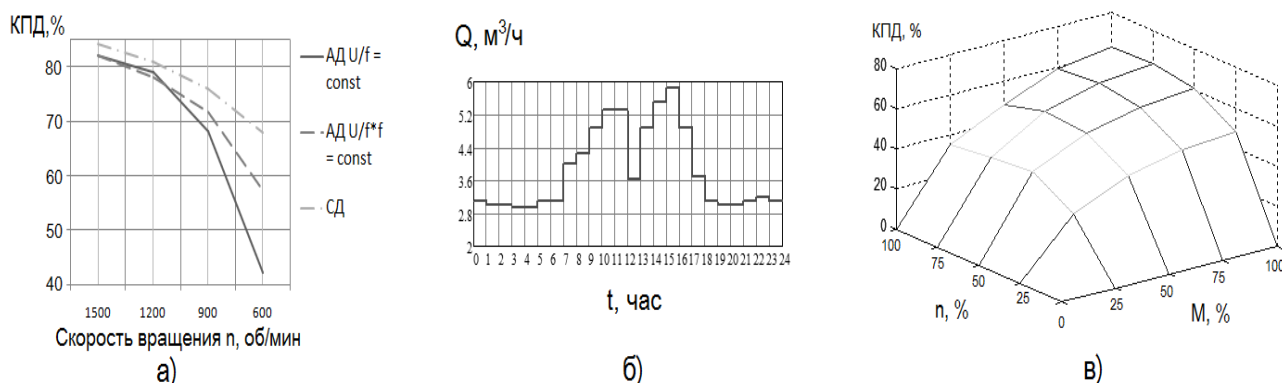


Рис. 1. Теоретическое сравнение (по схеме замещения) величины КПД:
а) КПД насосной установки при различных способах регулирования,
б) график дневной загрузки насосной установки,
в) экспериментальная характеристика КПД (M, n) для АИР 71А4

В отечественной практике при расчете энергопотребления ЧРП описанное явление уменьшения КПД обычно не учитывается [1]. Одной из основных причин этого является недостаточность паспортных данных двигателя для номинального режима, приводимых в соответствие с ГОСТом, для достаточно точной оценки КПД двигателя в режимах при пониженной скорости и частичной нагрузке.

Предметом данной работы является оценка влияния на величину энергопотребления ЧРП вышеописанного явления, снижения КПД привода при увеличении глубины регулирования. С этой целью рассматривается случай работы насосной установки *Calpeda* NM4 25/200BE (0,55 кВт, 1450 об./мин), которая используется для перекачки технологической жидкости, с плотностью $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$. Загрузка насоса по требуемому расходу воды при пиковом потреблении близка к номинальной и имеет в течение дня распределение, типичное для насоса промышленного предприятия (рис. 1, б). Характеристики насоса по напору H и КПД, в зависимости от расхода Q при работе на номинальной скорости, взяты из сообщаемых производителем данных [2]. Для привода насоса должен использоваться электродвигатель 0,55 кВт, 1500 об./мин. В качестве такого двигателя в данной работе рассматривается АИР 71А4 российской фирмы «Eneral». Необходимые для расчетов значения КПД двигателя в различных режимах при питании от ПЧ были экспериментально измерены, в ходе ряда

нагрузочных опытов. В качестве источника питания двигателя использовался преобразователь частоты ABB ACS150-03E-04A1-4. Потребляемая из сети приводом насосной установки электрическая мощность рассчитывается по формуле [1]:

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta_{\Sigma}} = \frac{r \cdot g \cdot H \cdot Q}{\eta_{\text{pump}} \cdot \eta_{\text{motor}} \cdot \eta_{\text{FC}}}, \quad (1)$$

где P_2 – полезная мощность, создаваемая установкой; $r = 1000 \text{ кг/м}^3$ – плотность перекачиваемой технологической жидкости, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$; Q – расход жидкости, обеспечиваемый насосом в данном режиме; H – напор, обеспечиваемый насосом данным режиме; $\eta_{\Sigma} = \eta_{\text{pump}} \cdot \eta_{\text{motor}} \cdot \eta_{\text{FC}}$ – результирующий КПД установки. Здесь η_{pump} – КПД насоса, η_{motor} – КПД двигателя, η_{FC} – КПД преобразователя частоты.

КПД и напор насоса при номинальной скорости и текущем расходе определяются из паспортных данных насоса. Для пересчета характеристик работы насоса на другое значение расхода используются формулы подобия [1]. Изменение КПД насоса η_{pump} при изменении скорости вращения не учитывается. Величина КПД преобразователя частоты также была принята постоянной и равной экспериментальному значению, измеренному в номинальном режиме: $\eta_{\text{FC}} = 0,95$. Суточное энергопотребление установки рассчитывается по формуле:

$$\Delta W_{\text{day}} = \sum_i^k P_i \cdot t_i, \quad (2)$$

где ΔW_{day} – суточная экономия электроэнергии в результате применения предлагаемого решения; P_i – экономия мощности, соответствующего i -му интервалу времени, в течение которого насос работал с постоянной нагрузкой, кВт; t_i – продолжительность i -го интервала времени, ч; $k = 24$ – число рассматриваемых интервалов времени на общем временном интервале.

Для оценки величины дополнительных потерь энергии в электродвигателе при регулировании сравним результаты расчета величины энергопотребления, принимая в первом случае величину КПД электродвигателя в формуле (1) неизменной и равной экспериментальному значению КПД двигателя в номинальном режиме $\eta_{\text{motor}} = \eta_{\text{ном}} = 0,63$. Во втором случае величина КПД двигателя рассчитывается, согласно экспериментальной зависимости (рис. 1, в). Рассчитанное по формуле (2) дневное энергопотребление привода в первом случае составляет $W_1 = 4,925 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$. При учете реального изменения КПД двигателя в режимах с регулированием скорости (рис. 1, в) эта величина составляет уже $W_2 = 6,645 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$. Таким образом, в первом случае не учитывается 26 % всей реально потребляемой мощности. Это приводит к недооценке годовой стоимости электроэнергии, потребляемой приводом, на 1380 руб. (стоимость кВт·ч принята 2,2 руб. [3]) при стоимости электродвигателя АИР 71А4, равной 1800 руб.

По результатам проведенной работы можно сделать следующие выводы:

– в работе на основе экспериментальных данных рассмотрен эффект изменения эффективности ЧРП при изменении глубины регулирования скорости. Показано, что неучет рассматриваемого фактора приводит к значительному недоучету действительного энергопотребления электропривода, что может быть причиной недооценки экономического эффекта внедрения ЧРП более высоких классов энергоэффективности и реализации других мер по увеличению КПД привода;

– мерой, которая значительно упростит корректный учет энергопотребления, является дальнейшее развитие стандартизации систем ЧРП. К имеющимся данным, доступным покупателю частотно-регулируемых двигателей и комплектно поставляемого ЧРП (ПЧ+двигатель), необходимо добавить информацию о КПД двигателя при частичной нагрузке и частичной скорости. Такой информацией, в соответствии со стандартом EN 50598-2, уже начинают снабжать поставляемые ЧРП ведущие европейские производители.

Список литературы

1. Лезнов Б. С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздуходувных установках. М. : Энергоатомиздат, 2006.
2. NM4, NMS4, Close Coupled Centrifugal Pumps: catalogue. Calpeda, 2012.
3. Электроэнергетика : тенденции и прогнозы : аналитический бюллетень. М. : РИА Новости, 2014. Вып. 14.

УДК 621.486

Калмыкова Н. С., Мурашова В. Н., Демин Ю. К., Картавец С. В.
Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова
dyomin.ura@yandex.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ORC В МНЛЗ

За первые 8 месяцев 2014 года выплавка стали в мире составила 1,096 млрд т, что на 2,4 % больше, чем за аналогичный период 2013 г. [1]. Около 90 % всей производимой в мире стали разливается на машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). При этом затраты электроэнергии на собственные нужды МНЛЗ составляют 1,87 кВт·ч на каждую тонну разливаемой стали [2].

Следует отметить, что при разливке стали в МНЛЗ отводится порядка 840 МДж/т тепловой энергии [3]. Вся эта теплота передается охлаждающей воде, в результате чего может быть получен низкопотенциальный пар с температурой около 100 °С.

Таким образом, возникает задача по поиску решения для использования, отводимого в МНЛЗ теплового потока.

При выборе направления использования отведенной теплоты необходимо в первую очередь учитывать собственные нужды МНЛЗ, состоящие в основном